Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 16, Issue 2, No. 41, Summer 2025
DOI: 10.22108/pom.2025.144012.1602

(Research paper)

Sustainable Multi-Objective Mathematical Modeling for Selecting a Technology Transfer Method in the Automotive Battery Industry

Amir Hossein Latifian
Department of Technology Transfer Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, latifianamirhossein@gmail.com
Reza Tavakkoli-Moghaddam *
School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, tavakoli@ut.ac.ir
Masoud Latifian
Department of Technology Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, latifian.masoud@gmail.com
Mahdi Kashani
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, mahdikashani@yahoo.com

Purpose: In today's world, characterized by scientific advancements and the complexity of technological processes, collaboration has become a crucial aspect of organizational strategy and public policies for technology development. Success in the modern era hinges on technology. Technology transfer is a domain that applies technology management, necessitating both comprehensiveness and foresight. This study introduces a novel sustainable multi-objective model for selecting the technology transfer method in car battery manufacturing.

Design/methodology/approach: This study is primarily practical, as it focuses on implementing the model within a specific industry. Regarding research methods, it employs survey and descriptive research techniques. However, due to its typology and inherent nature, this research is classified as hybrid, utilizing a range of suitable qualitative approaches. The initial step involves calculating the importance coefficient of technology transfer methods in the automotive battery sector using the

* Corresponding author, 0000-0002-6757-926X 2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

ordinal priority approach, gathering experts' opinions through a survey. Subsequently, the appropriate technology transfer method is identified using a multi-objective mathematical model.

Findings: According to the results, joint venture approaches, direct foreign investment, and co-research and development have demonstrated superior performance compared to other evaluation criteria. The findings indicate that joint ventures should be prioritized for companies aiming to develop and compete in the global market. This approach enables companies to enhance their operations, modernize production strategies, boost productivity, and expand production capacity through the direct and ongoing support of larger firms. Consequently, a foundation for increasing capacity and production rates will be established. The low ranking of training methods is another significant finding. It suggests that experts believe training methods will not positively impact the company's competitive position or production capacity, in addition to requiring substantial time investment. The effectiveness of strategies such as training, hiring, and resource exchange remains uncertain. Finally, to reduce fixed costs, risks, and potential job losses associated with the transfer of new technology, a multi-objective optimization model utilizing the meta-heuristic algorithms SPEA II and AECM, which was effectively implemented in eight automotive battery manufacturers, is proposed.

Research limitations/implications: Technology transfer is one of the most fundamental issues in technology, and its implementation significantly impacts the processes, cycles of technology and innovation, and wealth creation in developing countries. This intricate process can become a challenge without adequate knowledge. Therefore, technology must either be transferred or created, which entails high costs and extended timeframes that are complicated by the rapid pace of technological advancement. The adaptability, effectiveness, and development of technology for acquiring technical knowledge are critical factors in the technology transfer process. The current research lays the groundwork for identifying the appropriate technology transfer method in the car battery industry, providing substantial assistance to companies in updating technology, enhancing diversity and production capabilities, and competing effectively with both domestic and foreign competitors.

Practical implications: Developing countries can draw valuable lessons in technological and industrial development from the successful experiences of certain industrialized and recently industrialized nations, particularly those in East Asia and Latin America. Based on these successful experiences, the broad acquisition and transfer of appropriate modern technologies into these countries would enhance their productivity and lead to rapid industrial development.

Originality/value: This research evaluates technology transfer methods in the automotive battery industry under conditions of uncertainty using a multi-objective optimization model. The objectives include minimizing the fixed costs of technology transfer, the risks associated with technology transfer, and the number of jobs lost due to technology transfer. The application of the meta-innovative solution distinguishes this study from other research conducted in the field.

Keywords: Technology transfer, Multi-objective mathematical optimization, Strength Pareto evolutionary algorithm, Car battery manufacturing

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۲، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۴۰۴
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ ص ۵۱-۷۲
DOI: 10.22108/pom.2025.144012.1602

(مقالهٔ پژوهشی)

مدل‌سازی ریاضی چندهدفه برای انتخاب شیوهٔ انتقال تکنولوژی در صنعت باتری‌سازی خودرو

امیرحسین لطیفیان[۱]؛ رضا توکلی مقدم[۲*]؛ مسعود لطیفیان[۳]؛ مهدی کاشانی[۴]

۱- دکتری گروه مدیریت انتقال تکنولوژی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، latifianamirhossein@gmail.com
۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، tavakoli@ut.ac.ir
۳- دکتری گروه مدیریت تکنولوژی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، latifian.masoud@gmail.com
۴- کارشناس ارشد گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mahdikashani@yahoo.com

چکیده: موفقیت در جهان امروز، به استفاده از تکنولوژی وابسته است. یکی از زمینه‌های اعمال مدیریت تکنولوژی، که مستلزم این جامع‌نگری و دورنگری است، انتقال تکنولوژی است. با توجه به اینکه بیشترین سهم تجارت فناوری جهان در دست شرکت‌های چندملیتی کشورهای صنعتی است، بنابراین موضوع انتقال تکنولوژی در زمرهٔ یکی از پراهمیت‌ترین و مشکل‌ترین تصمیمات اقتصادی محسوب می‌شود؛ از این رو در این تحقیق، یک مدل جدید چندهدفه برای انتخاب شیوهٔ انتقال تکنولوژی در صنعت باتری‌سازی خودرو پیشنهاد شده است. ابتدا شیوه‌های انتقال تکنولوژی، با استفاده از روش اولویت ترتیبی وزن‌دهی و سپس ازطریق ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، شیوه‌های بهینهٔ انتقال تکنولوژی برای هر یک از کارخانه‌ها مشخص شد. مدل پیشنهادی نیز با استفاده از روش اپسیلون-محدودیت تکامل‌یافته و نسخهٔ دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (*SPEA-II*) حل شد. نتایج حاصل‌شده نشان می‌دهد روش‌های سرمایه‌گذاری مشترک، تحقیق و توسعهٔ مشترک و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، از عملکرد بهتری نسبت‌به دیگر روش‌های انتقال تکنولوژی در صنعت باتری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: انتقال تکنولوژی، بهینه‌سازی ریاضی چندهدفه، الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو، صنایع باتری-سازی خودرو

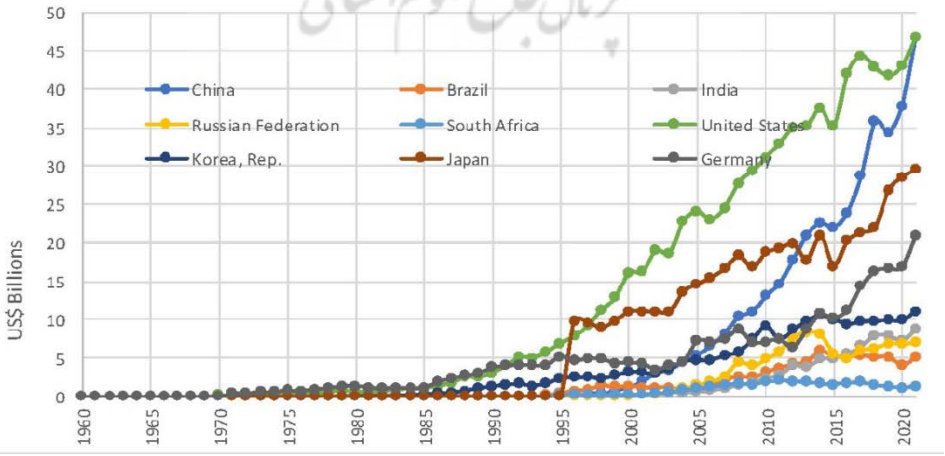
* نویسنده مسئول، 0000-0002-6757-926X

2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

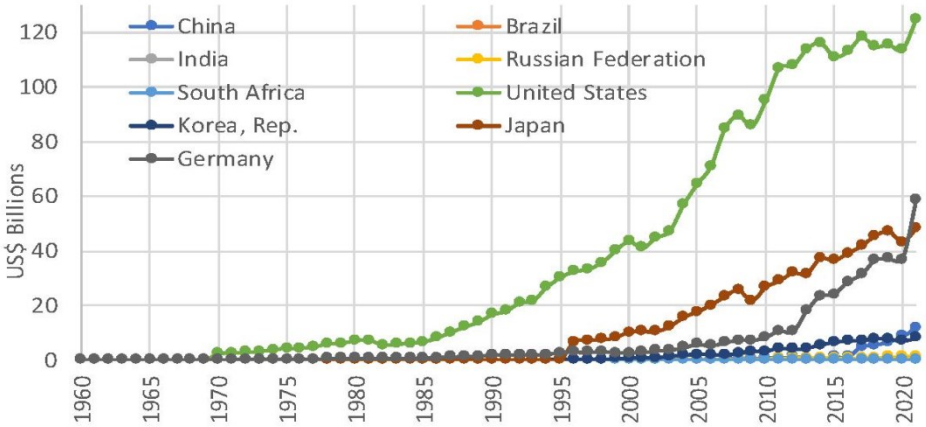
جهانی‌شدن، همراه با توسعهٔ فناوری، تأثیر فوق‌العاده‌ای بر رقابت‌پذیری ملی داشته است. این تحولات بر استراتژی‌ها، تاکتیک‌ها و تصمیمات عملیاتی سازمان‌ها تأثیر می‌گذارند. توجه به کاربردهای انتقال و تجاری‌سازی فناوری، به‌عنوان یک مسئله حیاتی در بازار جهانی رقابتی بسیار مهم است (Lee et al., 2018). با توجه به اینکه در کشورهای جهان سوم، نرخ تولید فناوری بسیار پایین است، بنابراین به‌منظور ارتقای محصولات و توسعه در این کشورها، به واردات تکنولوژی از کشورهای پیشرو نیاز است (Bertsch, 1992). مدیریت تکنولوژی، رقابت‌های دائمی را برای شرکت‌ها پیشنهاد می‌دهد که این به افزایش هزینه و پیچیدگی محصولات و خدمات منجر می‌شود (Günsel, 2015; Buzás, 2019). درواقع تغییرات و فرایندهای جهانی به‌طور عمده، به توسعه و نوآوری تکنولوژی‌های جدید منجر می‌شود و بیش از ۵۰درصد از محصولات جدید و فرایندهای آن با عنوان انتقال تکنولوژی، پیش‌زمینهٔ مهمی ازنظر عملی و تئوری دارد (Otero et al., 2023). مطالعات اخیر، اهمیت بالای تحقیق و توسعهٔ خارجی را برای رشد بهره‌وری داخلی، به‌عنوان یکی از عوامل جهانی افزایش انتقال تکنولوژی در بین کشورها و به‌خصوص در بین کشورهای توسعه‌یافته را نشان می‌دهد که به توسعهٔ یکدیگر منجر می‌شود. از طرفی نیز پیش‌بینی بلندمدت فناوری و رشد اقتصادی برای کشورهای در حال توسعهٔ آسیایی (نظیر ایران، پاکستان، هند و ...) بسیار مهم است (Hsiao & Liu, 2012).

انتقال فناوری، فرآیندی است که برای دستیابی به پیشرفت شرکت‌ها یا کشورها در زمینه‌های مختلف ازجمله رقابت‌پذیری و سود مالی اتفاق می‌افتد (Hsu et al., 2015; Bigliardi et al., 2015). این مفهوم به نقل از ادارهٔ ثبت اختراعات اروپا عبارت است حرکت فناوری و یا دانش فنی از یک شخص یا سازمان، به شخص یا سازمان دیگر، با هدف تبدیل تحولات نوآورانه به محصولات قابل فروش (Bozeman et al., 2015). این انتقال به‌دلیل فشار فناوری (ازطریق تحقیق) یا کشش بازار (ازطریق صنعت) است. دامنهٔ بین‌المللی تجاری‌سازی فناوری ممکن است شامل کشورهای توسعه‌یافته، کشورهای در حال توسعه و دیگر کشورهای دارای گذار اقتصادی باشد (Ravi & Janodia, 2021). انتقال فناوری در به دست آوردن مزیت در زمان، هزینه و سهم بیشتری از بازار و درنتیجه بهبود بهره‌وری، به شرکت‌ها کمک می‌کند (Huong & Hieu, 2025).



شکل ۱- تجارت مالکیت معنوی (واردات به میلیارد دلار)

Fig. 1- Trade in intellectual property (imports in US$ billions)



شکل ۲- تجارت مالکیت معنوی (صادرات به میلیارد دلار)

Fig. 2- Trade in intellectual property (exports in US$ billions)

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، رشد سریع اقتصادی چین با سرعت بالا، به‌واسطهٔ سرمایه‌گذاری برای کسب مالکیت معنوی فناوری از ۱٫۳ میلیارد دلار (آمریکا) در سال ۲۰۰۰ تا ۱۳ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۰ و حدود ۴۷ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ حاصل شده است.

با توجه به رشد سریع، این موضوع تعجب‌آور نیست که تولید با تکنولوژی بالا (مانند خودرو، کامپیوتر، تلفن همراه و داروسازی) و خدمات با ارزش افزودهٔ بالا (مانند تجارت الکترونیک، فین‌تک، رایانش ابری، فناوری‌های انرژی پیشرفته و غیره)، همه به برخی از فناوری‌های توسعه‌یافته در جاهای دیگر بستگی دارد. همان‌طور که چین به یک تولیدکنندهٔ عمده تبدیل می‌شود، سطح واردات فناوری آن به سطح ایالات متحده رسیده است.

با توجه به اینکه بیشترین سهم تجارت فناوری جهان در دست شرکت‌های چندملیتی کشورهای صنعتی است، بنابراین موضوع انتقال فناوری در زمرهٔ یکی از پراهمیت‌ترین و مشکل‌ترین تصمیمات اقتصادی برای کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. با این حال، تنها در صورتی که عوامل این انتقال به‌صورت علمی و صحیح انجام شود، عاملی در جهت حل بحران‌های اقتصادی و ارتقای استانداردهای زندگی قلمداد می‌شود. بر همین اساس و به‌منظور دستیابی به هدف مذکور، انتقال فناوری در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت باتری‌سازی در چند سال اخیر، متداول بوده است (Li & Yuan, 2022).

بنابراین هدف از این پژوهش، ارائهٔ رویکردی دومرحله‌ای برای انتخاب شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنایع باتری‌سازی خودرو است. در مرحلهٔ اول، ضریب اهمیت شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنایع باتری‌سازی خودرو با استفاده از روش اولویت ترتیبی تعیین می‌گردد؛ سپس یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفهٔ جدید با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی ریسک انتقال تکنولوژی و کمینه‌سازی تعداد شغل‌های از دست رفتهٔ ناشی از انتقال تکنولوژی، برای انتخاب شیوه‌های بهینه پیشنهاد می‌شود. درنهایت به‌دلیل چندهدفه‌بودن مدل پیشنهادی، از رویکرد محدودیت-اپسیلون تقویت‌شده[1] و نسخهٔ دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو[2] برای حل مدل ریاضی و مقایسهٔ نتایج بهره گرفته خواهد شد.

در ادامه، ساختار پژوهش به شرح زیر تقسیم‌بندی شده است: بخش دوم، پیشینهٔ پژوهش را مرور می‌کند، بخش سوم، رویکرد دومرحله‌ای پیشنهادی پژوهش را شرح می‌دهد، بخش چهارم دربارهٔ نتایج محاسبات بحث می‌کند و درنهایت در بخش پنجم نیز، نتیجه‌گیری کلی و برخی پیشنهادها برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- پیشینهٔ تحقیق

در این بخش، مبانی نظری، پیشینهٔ پژوهش و همچنین شکاف تحقیق بررسی می‌شود.

۲-۱- صنعت باتری‌سازی

بدون شک یکی از مهم‌ترین ساخته‌های بشر، باتری است. بسیاری از صنایع مهم جهان، که کالاها و محصولات مورد نیاز انسان و جوامع پیشرفتهٔ امروزی را تولید می‌کنند، به‌منظور تداوم تولید و استمرار فعالیت‌هایشان به این محصول صنعتی وابسته‌اند. امروزه صنعت باتری‌ها به تجارت بزرگی تبدیل شده است تا جایی که مؤسسهٔ باتل مموریال[۳] آمریکا پیش‌بینی کرده است که باتری‌ها، رتبهٔ دوم از میان ۱۰ فنّاوری کلیدی را دارند که در ۲۰ سال آینده، تجارت بین‌المللی را شکل خواهند داد (Huang et al., 2023). در این عصر، به‌حدی به این محصول صنعتی نیاز است که از ساده‌ترین وسایل ضروری زندگی تا پیچیده‌ترین تجهیزات فضایی و تحقیقاتی به انواع گوناگون باتری‌ها وابسته‌اند.

۲-۲- انتقال تکنولوژی

انتقال فناوری به روشی گفته می‌شود که طی آن مؤسسات تحقیقاتی دولتی، فناوری‌های جدید توسعه داده شده را به شرکت‌های خصوصی انتقال می‌دهند و تلاش می‌کنند تجاری‌سازی فناوری‌های منتقل‌شده را تحریک و ارتقا دهند. هدف اصلی این روش، افزایش آگاهی عمومی از چنین فناوری‌هایی برای تقویت رقابت صنعتی و فناوری است که به سهم خود، به افزایش رقابت‌پذیری در سطح ملی منجر می‌شود (Lee et al., 2018 & Kasperson, Kasperson, 2022;). این مفهوم از مقولهٔ مدیریت نوآوری و تحقیق و توسعه نشأت گرفته و با مطرح‌شدن انتقال فناوری میان کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، طرح ابعاد حقوقی و قراردادی آن برجسته‌تر شده است (Majidpour, 2017). در نظر گرفتن شرایط کشور و صنعت بهره‌بردار در انتقال تکنولوژی، زمینهٔ رقابتی حضور صنعت را در بازار فراهم می‌کند. یکی از ابزارهای مهم برای صنعتی‌سازی کشورهای در حال توسعه، استفاده از فناوری‌های پیشرفتهٔ کشورهای صنعتی است؛ به‌طوری که کشورهای زیادی که اکنون از آنها با عنوان کشورهای پیشرفته یاد می‌شوند، مزایای زیادی از انتقال تکنولوژی به دست آورده‌اند (Christensen et al., 2015).

۲-۳- مرور پیشینهٔ پژوهش

مطالعات تجربی در زمینهٔ انتقال فناوری و عملکرد نوآورانه برای کشورهای در حال توسعه بسیار کم است (Amirghodsi et al., 2022 Lee et al., 2018). انتقال تکنولوژی از مباحث داغ در بین محققان است و تحقیقات اندکی در این رابطه انجام شده است که هرکدام از یک بعد به قضیه نگریسته‌اند. در ادامه در جدول ۱، به خلاصهٔ

بررسی پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع تحقیق پیشنهادی در سال‌های اخیر ازنظر نوع مسئله، روش حل و روش‌های استفاده‌شده، اشاره شده است.

جدول ۱- خلاصهٔ پیشینهٔ پژوهش

Table 1- Summary of the literature

رفرنس	سال	نوع مسئله				روش حل		روش/متدولوژی/رویکرد بهینه‌سازی ریاضی
		تئوری تصمیم	بهینه‌سازی ریاضی	تحلیل آماری	دیگر موارد	قطعی	تئوری تصمیم: ابتکاری	تئوری تصمیم: فراابتکاری
امیرقدسی و همکاران[۴]	۲۰۲۰							روش بهترین-بدترین، تحلیل فرآیند شبکه‌ای، برنامه‌ریزی آرمانی
لوویو و دایم[۵]	۲۰۲۰							تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)
امینی و همکاران[۶]	۲۰۲۰							تحلیل سلسله‌مراتبی
چو و شنکویا[۷]	۲۰۲۰							تحلیل رگرسیون
داهویی و همکاران[۸]	۲۰۲۱							روش ویکور، روش ماباک، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح
لطیفیان و همکاران[۹]	۲۰۲۲							روش دیمتل، روش بهترین-بدترین، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح
قاسم‌زاده و همکاران[۱۰]	۲۰۲۲							دیمتیل و تحلیل فرآیند شبکه‌ای
شانه‌ای[۱۱]	۲۰۲۳							تحلیل سلسله‌مراتبی
مهری‌نژاد و همکاران[۱۲]	۲۰۲۳							نظریهٔ داده‌بنیاد
بیات ترک و همکاران[۱۳]	۲۰۲۳							تحلیل سلسله‌مراتبی
رضایی و همکاران[۱۴]	۲۰۲۴							تاپسیس
ترن و همکاران[۱۵]	۲۰۲۴							دیمتیل فازی
پژوهش پیشنهادی	-							روش اولویتی ترتیبی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مختلط عدد صحیح

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۳- رویکرد ترکیبی دومرحله‌ای پیشنهادی

در این بخش، تعاریف اساسی مربوط به رویکرد ترکیبی دومرحله‌ای پیشنهادی به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

۳-۱- روش اولویت ترتیبی

روش اولویت ترتیبی[۱۶]، یکی از جدیدترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توانایی حل مسائل انفرادی و گروهی را حتی در شرایطی که داده های ورودی ناقص هستند را دارد. این روش با بهره‌گیری از رویکرد برنامه‌ریزی خطی به‌گونه‌ای طراحی شده است که به بی‌مقیاس‌سازی داده‌ها، روش‌های میانگین‌گیری برای تجمیع

نظرات خبره‌ها، ماتریس مقایسات زوجی و ... نیازی ندارد. عطایی و همکاران[۱۷] (۲۰۲۰) در پژوهشی برای اولین بار، روش اولویت ترتیبی را معرفی کردند.

برای توضیح مراحل روش اولویت ترتیبی، ابتدا باید متغیرها، پارامترها و مجموعه‌ها را بشناسیم. این اطلاعات در جدول ۲ بیان شده است (Ataei et al., 2020).

جدول ۲- مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترهای روش OPA

Table 2- Sets, variables and parameters of the OPA method

اندیس‌ها	
خبره‌ها	$i \in (1,2,\dots,p)$
معیارها	$j \in (1,2,\dots,n)$
گزینه‌ها	$k \in (1,2,\dots,m)$
متغیرها	
تابع هدف	Z
وزن شاخص jام توسط شخص خبرهٔ iام در رتبهٔ rام	W_{ijk}^{r}

به‌طور کلی مدل ریاضی خطی روش اولویت ترتیبی برای تعیین ضرایب وزنی شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنعت باتری‌سازی خودرو، به شرح زیر بیان می‌شود:

$$
\begin{aligned}
&Max\ Z \\
&\text{s.t.} \\
&Z \le i\left(j\left(r\left(W_{ijk}^{r} - W_{ijk}^{r+1}\right)\right)\right) \quad \forall i,j,k \text{ and } r \\
&Z \le ijmW_{ij}^{m} \quad \forall i,j \text{ and } k \\
&\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} W_{ijk} = 1 \\
&W_{ijk} \ge 0 \quad \forall i,j \text{ and } k
\end{aligned}
\tag{۱}
$$

درنهایت نیز وزن شیوه‌های انتقال تکنولوژی ازطریق رابطهٔ (۲) تعیین می‌شود:

$$
\begin{aligned}
&W_i = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} W_{ijk} \ \forall i \\
&W_k = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{n} W_{ijk} \ \forall k \\
&W_j = \sum_{i=1}^{p}\sum_{k=1}^{m} W_{ijk} \ \forall j
\end{aligned}
\tag{۲}
$$

۳-۲- مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش با بررسی پیشینهٔ موضوع و بررسی کارهای پژوهشی انجام‌شده، مشاهده می‌شود که ارائهٔ یک مدل ریاضی برای مسئلهٔ انتقال تکنولوژی، یک ضرورت در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی بر مبنای توسعهٔ مدل ارائه‌شده در پژوهش لطیفیان و همکاران (۲۰۲۲) است. مفروضات مدل ریاضی ارائه‌شده به شرح ذیل است:

مفروضات

به‌طورکلی مفروضات مدل پیشنهادی به شرح زیر بیان می‌شود:

- روش‌های انتقال تکنولوژی به دو دستهٔ داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند؛
- انتقال تکنولوژی با استفاده از هریک از روش‌های داخلی و خارجی دارای هزینه‌های ثابتی است؛
- تکنولوژی‌های انتقال‌یافته از مبدأ خارجی با استفاده از روش‌های انتقال خارجی، ازطریق روش‌های داخلی و بومی‌سازی‌شده به نقاط نهایی یا کارخانه‌ها انتقال می‌یابند؛
- انتقال تکنولوژی در کارخانه‌ها و ظهور تکنولوژی‌های جدید سبب از دست رفتن یا پایان‌یافتن برخی از مشاغل موجود می‌شود (erge et al., 2020Ten B)؛
- انتقال تکنولوژی دارای ریسک‌های سیاسی- اقتصادی و اجتماعی است؛
- ضریب اهمیت هریک از روش‌های انتقال با استفاده از روش اولویت ترتیبی در نظر گرفته می‌شود؛
- انتقال تکنولوژی از منبع خارجی، ازطریق یک کشور توسعه‌یافته انجام می‌شود؛
- بیشتر تکنولوژی‌ها به‌صورت نوآورانه و تکنولوژی‌های سطح بالا در نظر گرفته شده‌اند.

مجموعه‌ها

i روش‌های موجود انتقال تکنولوژی مدنظر از کشور مبدأ خارجی منبع خارجی.

j نقاط نهایی (واحدهای صنعتی، کارخانه‌ها یا شهرک‌های صنعتی) کاندیدا برای استفاده یا به‌کارگیری تکنولوژی مدنظر.

k روش‌های بومی‌سازی‌شده برای انتقال تکنولوژی مدنظر از نقطهٔ مرکزی مبدأ داخلی.

t تعداد انواع تکنولوژی‌های موجود برای انتقال.

پارامترهای مدل

FC_{ti} هزینهٔ ثابت انتقال تکنولوژی نوع t با استفاده از روش نوع i برای منبع خارجی به هلدینگ مرکزی.

R_{ti} میزان ریسک سیاسی – اقتصادی – جغرافیایی مربوط به انتقال تکنولوژی نوع t با روش iام برای منبع خارجی.

R_{tkj} میزان ریسک سیاسی – اقتصادی – جغرافیایی مربوط به انتقال تکنولوژی نوع t با روش k به کارخانه یا نقطهٔ نهایی j.

P_i ضریب اهمیت انتقال تکنولوژی با استفاده از روش‌های خارجی i به دست آمده با روش OPA.

P_k ضریب اهمیت انتقال تکنولوژی با استفاده از روش‌های داخلی و بومی‌سازی‌شده k به دست آمده با روش OPA.

TTC_{tk} هزینهٔ ثابت انتقال تکنولوژی نوع t به روش k به نقطهٔ تقاضا یا نقطهٔ نهایی j (کارخانه یا واحد صنعتی j).

TMJ_{ti} تعداد شغل‌های از دست رفتهٔ ناشی از انتقال تکنولوژی نوع t با روش i.

TMJ_{tk} تعداد شغل‌های از دست رفته با انتقال تکنولوژی نوع t با روش k در نقطهٔ نهایی (کارخانه) j.

BES_{ti} میزان بودجهٔ در دسترس برای انتقال تکنولوژی نوع t با روش i برای منابع خارجی.

BIS_{tkj} میزان بودجهٔ در دسترس برای انتقال تکنولوژی نوع t با روش‌های داخلی k به نقاط نهایی (کارخانه‌ها) j.

JML_{tj} حد مجاز تعداد شغل‌های مورد انتظار به پایان رسیده برای انتقال تکنولوژی نوع t با روش k به نقطهٔ نهایی یا کارخانه j.

متغیرهای تصمیم

X_{ti} اگر انتقال تکنولوژی نوع t با روش iام برای منبع خارجی به کار رود، برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر.

Y_{tkj} اگر تکنولوژی نوع t با روش kام بومی‌سازی‌شده (منبع داخلی) برای انتقال به نقطهٔ نهایی (کارخانه یا واحد صنعتی jام) به کار رود، ۱ و در غیر این صورت صفر است.

تابع هدف و محدودیت‌ها

$$Min\, Z_1 = \sum_t \sum_i P_i\, FC_{ti}\, X_{ti} + \sum_t \sum_k \sum_j P_k\, TTC_{tkj}\, Y_{tkj} \quad (۳)$$

$$Min\, Z_2 = \sum_t \sum_i P_i\, R_{ti}\, X_{ti} + \sum_t \sum_k \sum_j P_k R_{tkj} Y_{tkj} \quad (۴)$$

$$Min\, Z_3 = \sum_t \sum_k \sum_j TMJ_{tkj}\, P_k\, Y_{tkj} \quad (۵)$$

s.t.

$$\sum_t \sum_i FC_{ti}\, X_{ti} \le BES_{ti} \quad (۶)$$

$$\sum_k \sum_t TTC_{tkj}\, Y_{tkj} \le BIS_{tkj} \qquad \forall\, j \quad (۷)$$

$$\sum_k TMJ_{tkj} Y_{tkj} \le JML_{tj} \qquad \forall\, t, j \quad (۸)$$

$$\sum_i X_{ti} = \sum_k \sum_j Y_{tkj} \qquad \forall t \quad (۹)$$

$$\sum_i X_{ti} \ge 1 \qquad \forall\, t \in T \quad (۱۰)$$

$$X_{ti}\, , Y_{tkj} \in \{0,1\} \quad (۱۱)$$

مدل ارائه‌شده، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه است، تابع هدف اول (معادلهٔ ۳)، حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت انتقال تکنولوژی از منبع خارجی به هلدینگ مرکزی یا واحد انتقال تکنولوژی شرکت با استفاده از روش‌های خارجی و سپس هزینه‌های انتقال تکنولوژی از هلدینگ مرکزی به کارخانه‌های نهایی را با استفاده از روش‌های بومی‌سازی‌شده و داخلی بررسی می‌کند. تابع هدف دوم (معادلهٔ ۴)، به‌دنبال حداقل‌سازی ریسک انتقال تکنولوژی از منبع خارجی به هلدینگ مرکزی با استفاده از روش‌های خارجی و سپس انتقال تکنولوژی‌ها با روش‌های داخلی بومی‌سازی‌شده به کارخانه‌های نهایی است. تابع هدف سوم (معادلهٔ ۵)، حداقل‌سازی تعداد شغل‌های از دسته رفته را به‌سبب انتقال تکنولوژی‌های جدید به کارخانه یا واحدهای صنعتی بررسی می‌کند.

محدودیت اول (معادلهٔ ۶)، محدودیت بودجه را برای انتقال تکنولوژی‌هایی با مبدأ خارجی با استفاده از روش‌های مربوطه بیان می‌کند. محدودیت دوم (معادلهٔ ۷)، بیانگر محدودیت بودجه برای کارخانه یا واحدهای صنعتی برای انتقال تکنولوژی‌های مدنظر است که به ازای هر کارخانه یا واحد صنعتی، مقادیر متفاوتی در نظر گرفته

شده است (با توجه به میزان فروش، درآمد و دیگر فاکتورهای تأثیرگذار که با واحد مرکزی یا هلدینگ مرکزی تعیین می‌شود). محدودیت سوم (معادلهٔ ۸) تضمین‌کنندهٔ این مورد است که با توجه به مسائل و فشارهای سیاسی و اجتماعی و مسئولیت‌پذیری صاحبان صنایع برای ایجاد شغل و توسعه، تعداد شغل‌های از بین رفتهٔ ناشی از انتقال تکنولوژی به کارخانه و واحدهای صنعتی از حد مجاز از پیش تعیین شده‌ای تخطی نکند. محدودیت چهارم (معادلهٔ ۹)، بیانگر تعادل انتقال تکنولوژی ازطریق به‌کارگیری روش‌های داخلی و خارجی است. محدودیت پنجم (معادلهٔ ۱۰)، بیانگر این مورد است که حداقل یکی از روش‌های انتقال تکنولوژی برای منبع خارجی به کار رود. محدودیت ششم (معادلهٔ ۱۱)، بیانگر نوع متغیرهای تصمیم مسئله است که هر دو از نوع باینری‌اند.

۳-۳- رویکرد حل مدل پیشنهادی

با عنایت به اینکه مدل ریاضی ارائه‌شده، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه و به‌دنبال بهینه‌کردن اهداف متناقض یا اهدافی است که به نوعی با یکدیگر در رقابت‌اند، از این رو استفاده از روش‌های دقیق برای حل مسائل پیچیده و بزرگ به‌علت زمان‌های اجرای طولانی منطقی نیست و بنابراین از روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله استفاده می‌شود.

در این بخش، گام‌های مربوط به روش‌های حل مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۳-۳-۱- روش محدودیت-اپسیلون تقویت‌شده

ماوروتاس[۱۸] در سال ۲۰۰۹، نسخهٔ بهبودیافته‌ای را از حل رویکرد محدودیت-اپسیلون تقویت‌شده در مقایسه با روش محدودیت سنتی ارائه کرد. گام‌های محدودیت-اپسیلون تقویت‌شده به شرح ذیل است (Huy et al., 2023):

گام ۱: یکی از توابع هدف، به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود؛

گام ۲: هر دفعه با لحاظ‌کردن یکی از تابع‌های هدف، مسئله حل و مقدار بهینهٔ هر تابع هدف به دست می‌آید.

گام ۳: در این روش بهترین و بدترین مقدار برای تابع هدف براساس معادلات ۱۲ و ۱۳، با استفاده از روش لکسیکوگراف، محاسبه می‌شود؛ به این صورت که بهترین مقدار تابع هدف اول برابر مقدار بهینهٔ آن در حالت بهینه‌سازی مسئله با در نظر گرفتن تابع هدف به‌صورت انفرادی است. در ادامه با بهینه‌سازی تابع هدف دوم، با این محدودیت که تابع هدف اول در مقدار بهینهٔ خود باقی بماند، بدترین مقدار تابع هدف دوم تعیین می‌شود. این کار تا بهینه‌سازی تمام توابع هدف ادامه می‌یابد و با این روش، بازهٔ هر تابع هدف تعیین می‌شود.

$$\left[f_i^{max}, f_i^{min}\right] \quad (۱۲)$$

$$r_i = f_i^{max} - f_i^{min} \quad (۱۳)$$

گام ۴: بازهٔ بین دو مقدار بهینهٔ توابع فرعی، به تعداد از قبل مشخص شده‌ای q_i تقسیم می‌شود و یک جدول مقادیر برای اپسیلون‌ها به دست می‌آید.

$$\varepsilon_i^k = f_i^{max} - \frac{r_i}{q_i} * k \quad k = 0,1,\dots,q_i \quad (۱۴)$$

گام ۵: هر بار با در نظر گرفتن هریک از مقادیر اپسیلون، مسئله با تابع هدف اصلی حل می‌شود؛ به این صورت که محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی با استفاده از متغیرهای مناسب کمبود یا مازاد به‌صورت

محدودیت‌های مساوی تبدیل و با در نظر گرفتن ضریب دلتا 10^{-3} تا 10^{-6} برای این متغیرهای مازاد یا کمبود، مسئله حل و جواب‌های کارا تولید می‌شود. مسئلهٔ جدید به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &Min\{f_1(x) + \delta * (s_2 + s_3 + \cdots + s_p)\} \\ &f_2(x) = \varepsilon_2 + s_2 \\ &f_3(x) = \varepsilon_3 + s_3 \\ &f_p(x) = \varepsilon_p + s_p \\ &x \in X, s_i \in R^+ \end{aligned} \quad (۱۵)$$

گام ۶: درنهایت جواب‌های پارتویی یافته‌شده گزارش می‌شود.

۳-۳-۲- نسخهٔ دوم الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر قوت پارتو

نسخهٔ دوم الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II)، یک نسخهٔ پیشرفته از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه SPEA است که یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌ها در جهت بهینه‌سازی است و به‌طور گسترده‌ای، در برنامه‌های دنیای واقعی، علمی و مهندسی به کار می‌رود. چارچوب کاری الگوریتم SPEA-II در ادامه تشریح می‌شود (Liu & Zhang, 2019):

N_E: حداکثر اندازهٔ آرشیو پاسخ‌های نامغلوب E

N_F: اندازهٔ جمعیت

K: پارامتر محاسبهٔ تراکم $\left(K = \sqrt{N_E + N_F}\right)$.

گام ۱: یک جمعیت از پاسخ‌های اولیه P_0 ایجاد کنید و قرار دهید. $E_0 = \emptyset$

گام ۲: برازندگی هر پاسخ i در مجموعهٔ $P_t \cup E_t$ را به‌صورت زیر محاسبه کنید.

زیرگام ۱-۲- ابتدا برازندگی خام پاسخ i را از رابطهٔ زیر محاسبه کنید:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t} s(j), \forall\, j > i \in P_t \quad (۱۶)$$

در این رابطه، علامت $j > i$ به معنای آن است که j بر پاسخ i غلبه می‌کند. همچنین $s(i)$ مقدار قوت پاسخ را نشان می‌دهد که در واقع تعداد پاسخ‌هایی است که ازطریق i مغلوب می‌شود.

زیرگام ۲-۲- تراکم پاسخ i را به‌صورت معادلهٔ زیر محاسبه کنید:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2}, \forall\, i \in P_t \quad (۱۷)$$

در این رابطه σ_i^k فاصلهٔ بین پاسخ i و kامین همسایگی نزدیک به آن است.

زیرگام ۳-۲- نهایتاً مقدار برازندگی از جمع مقدار برازندگی خام و تراکم پاسخ i به دست می‌آید.

$$F(i) = R(i) + D(i), \forall\, i \in P_t \quad (۱۸)$$

گام ۳: تمام پاسخ‌های نامغلوب موجود در مجموعهٔ $P_t \cup E_t$ را به E_{+1} کپی کنید. ممکن است دو حالت رخ دهد:

حالت اول: اگر $|E_{t+1}| > N_E$، به تعداد $|E_{t+1}| - N_E$ پاسخ با روش تکراری حذف پاسخ با معیار σ^k، حذف می‌شود. در واقع پاسخی که حداقل فاصلهٔ σ^k را از دیگر پاسخ‌ها دارد، در ابتدا حذف می‌شود. با این حال، اگر چند پاسخ دارای حداقل فاصله باشند، دومین کمترین فاصله مشخص و به همین صورت، پاسخ‌های اضافی حذف می‌شود (این معیار باعث می‌شود که پاسخ‌های مشابه یا نزدیک به هم، که اهمیتی در تراکم پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کنند، حذف شوند).

حالت دوم: اگر $|E_{t+1}| \leq N_E$، به تعداد $N_E - |E_{t+1}|$، پاسخ مغلوب‌شده براساس مقادیر برازندگی آنها از مجموعهٔ $P_t \cup E_t$ به مجموعهٔ E_{t+1} می‌یابد.

گام ۴: اگر شرایط خاتمه فراهم شده باشد، الگوریتم متوقف می‌شود و پاسخ‌های E_{t+1} را برمی‌گرداند.

گام ۵: با استفاده از روش رقابت دوتایی، والدین از مجموعهٔ E_{t+1} انتخاب می‌شود.

گام ۶: اپراتورهای ترکیب و جهش بر والدین به کار برده و به تعداد N_P فرزند تولید می‌شود. فرزندان در مجموعهٔ P_{t+1} کپی و به مقدار شمارنده یک واحد اضافه می‌شود $(t = t + 1)$ و سپس به گام ۲ بازگشت می‌شود.

۴- مطالعهٔ موردی و یافته‌ها

در این بخش نتایج حاصل از اجرای رویکرد ترکیبی به شرح زیر گزارش شده است.

۴-۱-تعیین رتبهٔ شیوه‌های انتقال تکنولوژی: روش *OPA*

در این مرحله، نظرات خبرگان در رابطه با شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنعت باتری‌سازی خودرو جمع‌آوری می‌شوند. به همین منظور براساس پرسش‌نامهٔ مربوطه، رتبهٔ شیوه‌ها به ازای هر خبره تعیین شد که مطابق با جدول بخش پیوست گزارش شده است. منظور از شیوه‌های انتقال تکنولوژی، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها در شرایطی تعریف شده است که طی آن، فناوری موردنیاز متقاضی، در ازای جلب رضایت عرضه‌کننده، در اختیار او قرار می‌گیرد. روش‌های انتقال تکنولوژی، با توجه به فناوری تقاضاشده و نحوهٔ انتقال، متفاوت و در بعضی از موارد بسیار متنوع است. روش‌های انتقال در نظر گرفته شده در این پژوهش، برای ارزیابی مطابق با جدول ۲ بیان شده است (Latifian et al., 2022).

پس از دستیابی به نظرات خبرگان در رابطه با شاخص‌ها، پارامترهای ورودی مدل روش اولویت ترتیبی (معادلهٔ ۱ و ۲) در نرم‌افزار GAMS وارد و پس از حل مدل مطابق با جدول ۳، ضرایب وزنی شیوه‌های انتقال تکنولوژی برای ورود به مدل چندهدفه پیشنهادی گزارش می‌شود.

جدول ۳- شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنایع باتری‌سازی خودرو

Table 3- Methods of technology transfer in automotive battery industries

نماد	شیوه‌های انتقال تکنولوژی	ضریب اهمیت
A_1	حق خرید امتیاز	۰/۰۲۱۴
A_2	آموزش و تحصیل	۰/۰۱۳۴
A_3	سرمایه‌گذاری مشترک	۰/۲۳۸۰
A_4	مهندسی معکوس	۰/۰۱۶۲
A_5	استخدام و تبادل نیروی انسانی	۰/۰۳۸۲
A_6	روش فرانشیز	۰/۰۶۳۲
A_7	تحت لیسانس	۰/۰۶۴۴
A_8	تحقیق و توسعهٔ مشترک	۰/۲۱۴۲
A_9	تأمین از بیرون	۰/۱۰۵۷
A_{10}	سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی	۰/۱۲۴۷

۴-۲- تخصیص بهینهٔ شیوه‌ها: حل مدل ریاضی پیشنهادی

ازطریق حل یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، مجموعهٔ شیوه‌های انتقال تکنولوژی به هر تولیدکننده تخصیص داده می‌شود. شایان ذکر است که در این پژوهش، هشت مجموعهٔ تولیدکننده در صنعت باتری‌سازی، یعنی صبا باتری، برنا باتری، پاسارگاد باتری، دورنا باتری ارس، سپاهان باتری، آذر باتری، نیرو گستران خراسان و وایا باتری در نظر گرفته شدند. در ادامه، مسئلهٔ دنیای واقعی موردی با استفاده از روش‌های محدودیت-اپسیلون تقویت شده و الگوریتم SPEA-II حل و این دو روش مقایسه شده است. در راستای حل مدل مقدار پارامترها برای مسئلهٔ موردی به شرح جدول ۴ ارائه شده است.

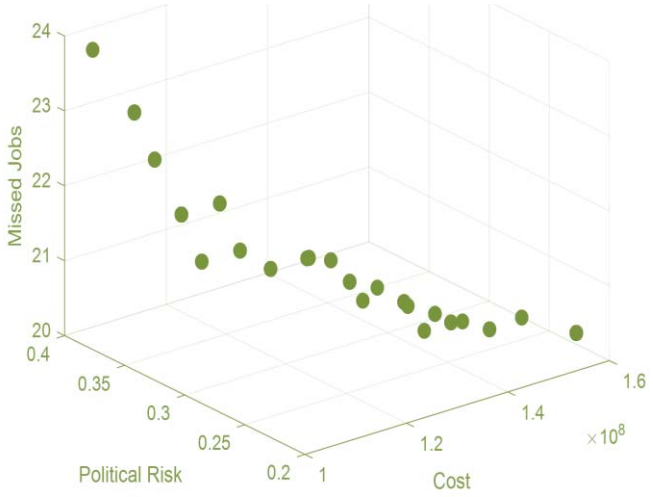
جدول ۴- اطلاعات ورودی مدل

Table 4- Model input data

FC_{ti}	در بازهٔ [۹۰۰۰۰۰۰۰۰۰؛ ۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای تومان
R_{ti}	مقدار آن در بازهٔ [۰,۱] در نظر گرفته شده است.
R_{tkj}	مقدار آن در بازهٔ [۰,۱] در نظر گرفته شده است.
P_i	مطابق با جدول ۳.
P_k	مطابق با جدول ۳.
TTC_{tkj}	در بازهٔ [۲۰۰۰۰۰۰۰۰۰, ۵۰۰۰۰۰۰۰۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای تومان
TMJ_{ti}	در بازهٔ [۱۰۰, ۵۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای نفر
TMJ_{tkj}	در بازهٔ [۱۰۰, ۵۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای نفر
BES	برابر با ۱۵۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شده است.
BIS_j	در بازهٔ [۱۸۰۰۰۰۰۰۰۰۰, ۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای تومان
JML_{tj}	در بازهٔ [۱۰۰, ۵۰] در نظر گرفته شده است – بر مبنای نفر

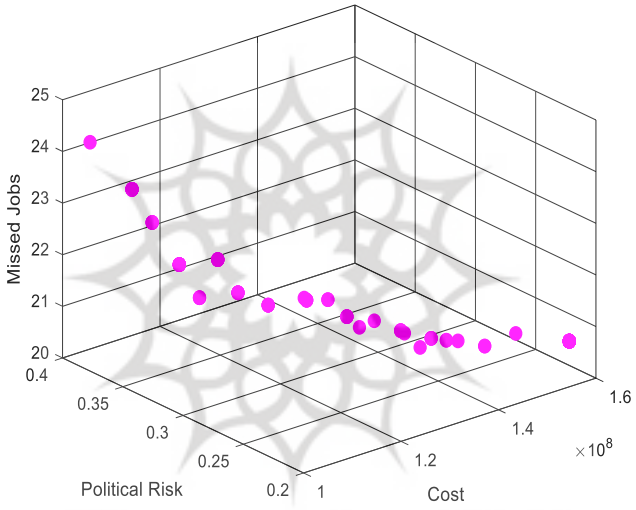
در مسئلهٔ موردی حل‌شده، تعداد هشت کارخانه (واحد صنعتی) بررسی شده است، همچنین تعداد روش‌های موجود برای انتقال تکنولوژی از منبع خارجی به هلدینگ مرکزی برابر با ۵ (روش‌های حق خرید امتیاز، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، تحت لیسانس، تأمین از بیرون و سرمایه‌گذاری مشترک)، تعداد روش‌های داخلی بومی‌سازی‌شده برای انتقال تکنولوژی به نقاط نهایی یا کارخانه‌ها برابر با ۵ (روش‌های آموزش و تحصیل، مهندسی معکوس، استخدام و تبادل نیروی انسانی، روش فرانشیز و تحقیق و توسعهٔ مشترک)، تعداد انواع تکنولوژی‌های موجود برای انتقال نیز برابر با ۵ در نظر گرفته شده است.

پس از حل مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون بهبودیافته، جبههٔ نهایی به‌صورت شکل ۳ ارائه شده است؛ سپس مدل ارائه‌شده با استفاده از الگوریتم SPEA-II ارائه‌شده حل شده است، جبههٔ الگوریتم در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳- جبههٔ پارتو بهینهٔ روش AECM از حل مدل

Fig. 3- Pareto-optimal front the AECM method of solving the model



شکل ۴- جبههٔ پارتو مربوط به الگوریتم SPEA-II از حل مدل

Fig. 4- Pareto front related to the SPEA-II algorithm of solving the model

پس از حل مدل مربوط به مسئلهٔ موردی مطالعه‌شده، مقدار نتایج زیر برای متغیرهای تصمیم مسئله حاصل و در جداول ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۵- چگونگی انتقال تکنولوژی t با روش خارجی iام به هلدینگ مرکزی

Table 5- How to transfer the technology t to the central holding using the external method i

تکنولوژی (t)	روش (i)		
	۳	۴	۳
۱		۱	
۲	✓	۲	✓
۳		۳	
۴	✓	۴	✓
۵	✓	۵	✓

جدول ۶- چگونگی انتقال تکنولوژی t با روش بومی kام به واحد صنعتی jام

Table 6- How to transfer the technology t to the industrial unit j with the local method k

تکنولوژی (t)	روش (k)	کارخانه (j)			
		۱	۵	۳	۱
۱	۱		۱	۱	
۲	۱		۱	۲	
۳	۴		۴	۳	
۴	۳	✓	۳	۴	✓
۵	۱		۱	۵	

همچنین مقدار توابع هدف دو روش محدودیت اپسیلون و الگوریتم SPEA-II در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- مقایسهٔ نتایج توابع هدف براساس روش‌های حل

Table 7- Comparing the results of objective functions based on solution methods

روش محدودیت-اپسیلون تقویت‌شده		
تابعه هدف اول	تابعه هدف دوم	تابعه هدف سوم
۱۵۶۸۳۳۸۰۰۰	۰/۲۱۴	۲۰/۳۲۳
الگوریتم SPEA-II		
تابعه هدف اول	تابعه هدف دوم	تابعه هدف سوم
۱۵۸۴۰۲۰۱۳۸	۰/۲۱۷۲	۲۰/۷۲۹
خطا		
تابعه هدف اول	تابعه هدف دوم	تابعه هدف سوم
۱/۰۰%	٪۱/۵۰	۲/۰۰%

۴-۳- تحلیل حساسیت

عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه، از عملکرد الگوریتم‌های تک‌هدفه بسیار پیچیده‌تر است و با توجه به معیارهای ارائه‌شده، یک شاخص ارزیابی برای بررسی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های ارائه‌شده کافی نیست. به‌طور کلی یک جواب ارائه‌شده ازطریق الگورریتم‌های چندهدفه، باید سه ویژگی داشته باشد:

۱- فاصلهٔ بین مجموعه جواب‌های غالب حاصل از مسئله توسط الگوریتم، با مجموعه پارتو بهینه کمینه باشد؛

۲- نحوهٔ توزیع جواب‌های پارتو به‌صورت یکنواخت باشد؛

۳- جواب‌های حاصل‌شده به‌صورت گسترده، بخش زیادی از مقادیر هریک از توابع هدف را پوشش دهند.

بنابراین به‌منظور تحلیل حساسیت الگوریتم، شاخص‌های ذیل تعریف شد:

- فاصله از نقطهٔ ایده‌آل[19]

مقدار این شاخص برابر است با فاصلهٔ نقاط پارتو الگوریتم بررسی‌شده از نقطهٔ ایده‌آل، این معیار که برای اندازه‌گیری میزان نزدیکی به سطح بهینهٔ پارتو واقعی به کار می‌رود و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n} \qquad (۱۹)$$

در این رابطه n، تعداد جواب‌ها در مجموعه بهینهٔ پارتو است و c_i، فاصلهٔ اقلیدسی هر عضو از مجموعهٔ پارتو از نقطهٔ ایده‌آل است که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$c_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^*)^2 + (f_{2i} - f_2^*)^2 + \ldots + (f_{mi} - f_m^*)^2} \quad (۲۰)$$

- شاخص پراکندگی[۲۰]

این شاخص وسعت جواب‌های پارتو یک الگوریتم را نشان می‌دهد و با رابطهٔ ۲۱ محاسبه می‌شود. هرچه شاخص DM بیشتر باشد، الگوریتم بهتر است:

$$DM = \left\{ \left(\frac{max f_{1i} - min f_{1i}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}} \right)^2 + \left(\frac{max f_{2i} - min f_{2i}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2 + \left(\frac{max f_{3i} - min f_{3i}}{f_{3,total}^{max} - f_{3,total}^{min}} \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (۲۱)$$

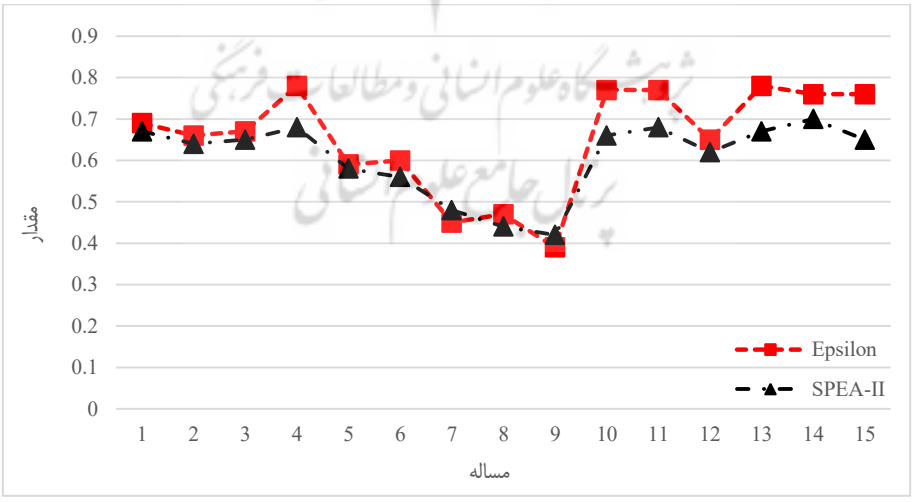
- شاخص فاصله[۲۱]

این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو در فضای حل را نشان می‌دهد، نحوهٔ محاسبهٔ این شاخص مطابق رابطهٔ ذیل است:

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{G^3} |\bar{d} - d_i|}{G^3 \times \bar{d}} \quad (۲۲)$$

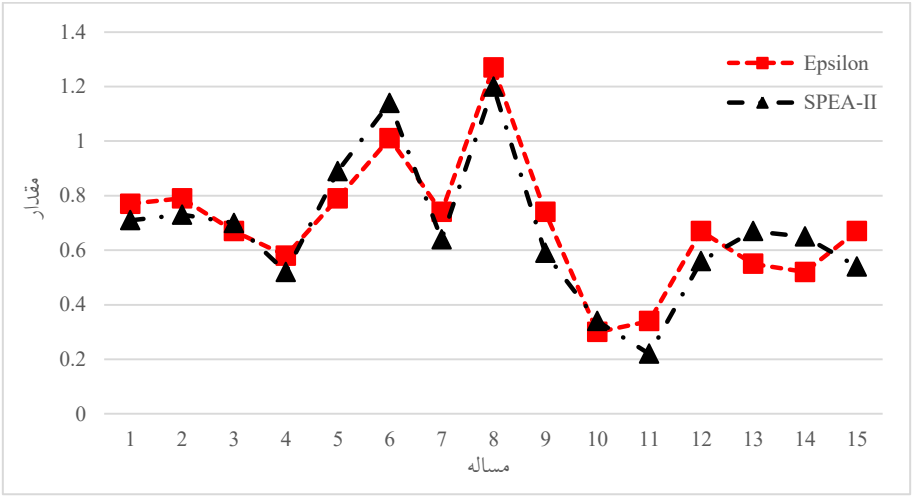
محاسبهٔ شاخص فوق در فضای سه بعدی به‌دلیل پیچده‌شدن نحوهٔ محاسبه برای تعیین نقاط پارتوی کناری، زمانبر است.

در ادامه با توجه به شاخص‌های معرفی‌شده، ۱۵ مسئله با ابعاد مختلف با روش حل دقیق (اپسیلون محدودیت بهبودیافته) و الگوریتم پیشنهادی SPEA-II حل و برای بررسی کیفیت و کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج ازطریق میانگین خطا مطابق شکل‌های ۵ الی ۷ تحلیل شد.



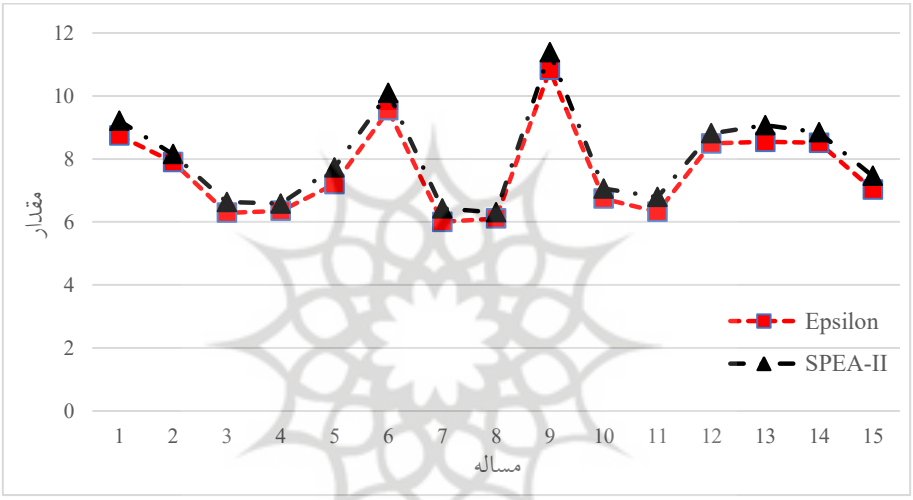
شکل ۵. نتایج عددی الگوریتم پیشنهادی SPEA-II و روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته – شاخص SM

Fig. 5- Numerical results of the proposed SPEA-II algorithm and the augmented epsilon-constraint method – SM index



شکل ۶. نتایج عددی الگوریتم پیشنهادی SPEA-II و روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته – شاخص DM

Fig. 6- Numerical results of the proposed SPEA-II algorithm and the augmented epsilon-constraint method – DM index



شکل ۷- نتایج عددی الگوریتم پیشنهادی SPEA-II و روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته – شاخص MID

Fig. 7- Numerical results of the proposed SPEA-II algorithm and the augmented epsilon-constraint method – MID

۵- بحث

انتقال تکنولوژی یکی از اساسی‌ترین مباحث در فناوری است و چگونگی اجرای آن نقش بسیار مهمی در فرآیند، چرخهٔ فناوری، نوآوری و همچنین خلق ثروت در جوامع در حال توسعه دارد. انتقال تکنولوژی، فرایند پیچیده و دشواری است که چنانچه بدون مطالعه و بررسی لازم انجام شود، نه‌تنها مفید نخواهد بود، ممکن است علاوه بر هدررفتن سرمایه و زمان، به تضعیف تکنولوژی ملی هم بیانجامد. موضوع بسیار مهم در انتقال تکنولوژی، قابلیت تطبیق، اثربخشی و توسعه برای فراگیری دانش فنی آن است.

همان‌طور که از جدول ۳ نتیجه می‌شود، روش‌های سرمایه‌گذاری مشترک، تحقیق و توسعهٔ مشترک و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، بهترین عملکرد را نسبت‌به دیگر شاخص‌های ارزیابی به دست آورده و بیانگر آن است که اگر شرکتی (در حوزهٔ تولید باتری) به‌دنبال رقابت در بازار جهانی است و قصد دارد تا در مسیر توسعه و پیشرفت گام بردارد، روش سرمایه‌گذاری مشترک، بالاترین اهمیت را دارد؛ زیرا با کمک و همکاری مستقیم و مداوم شرکت‌های بزرگ، بهبود در کسب و کار خود به وجود می‌آورد، به‌سمت مدرن‌شدن شیوه‌های تولید، افزایش

بازدهی و توان تولید پیش می‌رود و درنتیجه زمینهٔ افزایش ظرفیت و نرخ تولید در کسب و کار را فراهم می‌کند. از دیگر نتایج درخور توجه، به رتبهٔ پایین روش آموزش و تحصیل اشاره می‌شود. این موضوع بیانگر این است که کارشناسان شرکت‌های مربوطه معتقدند روشی مانند آموزش و تحصیل، علاوه بر اینکه زمان زیادی را برای انتقال موفق فناوری صرف می‌کند، نتایج آن چندان موجب بهبود وضعیت رقابتی و بهبود ظرفیت تولید شرکت نمی‌شود. آنها در موفق‌بودن روش‌های آموزش، تحصیل، استخدام و تبادل نیروی انسانی دارای تردیدند. مقایسهٔ دو جبههٔ پارتو (شکل‌های ۱ و ۲) و اطلاعات جدول ۷، تطابق بالای جواب‌های به دست آمده را در جبهه‌ها نشان می‌دهد، این امر بیانگر این مورد است که الگوریتم استفاده‌شده دارای عملکرد مناسب و پذیرفتنی است.

مقالهٔ حال حاضر در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام‌شده، به‌دلیل ارزیابی شیوه‌های انتقال تکنولوژی در صنایع باتری‌سازی خودرو در شرایط عدم قطعیت و با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیارهٔ ترکیبی، به‌کارگیری مدل بهینه‌سازی ریاضی برای تخصیص بهترین شیوهٔ انتقال تکنولوژی، لحاظ‌کردن پارامترهای مهمی نظیر ریسک، هزینه و اشتغال در مدل و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و فراابتکاری، تا حدود زیادی به شرایط واقعی و کاربردی نزدیک می‌شود و در زمرهٔ پژوهش‌های قابل استفاده و کاربردی در صنعت است.

۶- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی کشورهای در حال توسعه، درس‌های پرارزشی از تجربهٔ موفقیت‌آمیز بعضی از کشورهای صنعتی و تازه صنعتی شده، به‌خصوص کشورهای واقع در شرق آسیا و آمریکای لاتین در امر توسعهٔ تکنولوژی و صنعتی می‌گیرند. تجربهٔ موفقیت‌آمیز این کشورها نشان داده است که فراگیری و انتقال گستردهٔ تکنولوژی‌های مناسب و مدرن به این کشورها، آنها را قادر می‌کند تا بر بهره‌وری خود بیفزایند و درنتیجه به توسعهٔ سریع صنعتی این کشورها منجر شده است. در این پژوهش، تلاش شد با پیروی از اصول و چارچوب نظری و پژوهشی، مدلی ارائه شود که در آن عوامل مؤثر بر شیوه‌های انتقال تکنولوژی، با هدف بهبود عملکرد شرکت تبیین شود. به همین منظور در ابتدا با بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی، مجموعه‌ای از ۲۳ عامل در چهار دسته عوامل اقتصادی، فنی، مدیریتی و تجاری شناسایی شد و سپس با استفاده از رویکرد دلفی فازی، غربالگری و براساس نظرات یک کمیتهٔ خبره از کارشناسان و استادان حوزهٔ باتری بومی‌سازی شدند. در ادامه با به‌کارگیری روش دیمتل فازی، بهترین و بدترین عامل ازطریق بررسی میزان تأثیرپذیری و تأثیرگذاری عوامل نسبت‌به یکدیگر تعیین و سپس از روش بهترین-بدترین به‌منظور تعیین وزن مؤثر هر عامل و اولویت‌بندی روش‌های انتقال تکنولوژی استفاده شد. درنهایت یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه با اهدف حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت انتقال تکنولوژی، حداقل‌سازی ریسک انتقال تکنولوژی و حداقل‌سازی تعداد شغل‌های از دست رفته به‌سبب انتقال تکنولوژی‌های جدید پیشنهاد شد که با استفاده از روش اپسیلون-محدودیت تکامل‌یافته و الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II)، به‌طور کارایی حل شده است.

در تحقیقات آتی می‌توان از سایر رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره در سایر محیط‌های عدم قطعیت نظیر فازی شهود، اعداد Z و غیره استفاده و نتایج حاصله را با یکدیگر مقایسه نمود. همچنین می‌توان برخی از ورودی‌های مدل ریاضی پیشنهادی را در شرایط عدم قطعیت در نظر گرفت و جهت برخورد با آن از برنامه‌ریزی فازی، آرمانی و یا برنامه‌ریزی آنالیز استوار بهره گرفت.

References

Amini, E., Baniasadi, M., Vahidi, H., Nematollahi, H., Khatami, M., Amandadi, M., Malekian, L., & Safarpour, H. (2020). Affecting factors of knowledge-based companies using fuzzy AHP model, case study Tehran University Enterprise Park. *Journal of the Knowledge Economy*, *11(2)*, 574-592. https://doi.org/10.1007/s13132-018-0554-9.

Ataei, Y., Mahmoudi, A., Faylizadeh, M.R. & Li, D.F. (2020). Ordinal priority approach (OPA) in multiple attribute decision-making. *Applied Soft Computing*, *86*, 105893. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105893.

Amirghodsi, S., Bonyadi Naeini, A., & Makui, A. (2020). Dual model for selecting technology and technology transfer method using a combination of the Best-Worst Method (BWM) and goal programing. *Scientia Iranica*, *29(5)*, 2628-2646. https://doi.org/10.24200/SCI.2020.53925.3511.

Bayat Turk, A., Kazemian Mohamadabadi, M., & Kazemian Mohamadabadi, A. (2023). Design and presentation of a conceptual model for technology transfer to supply technological products in the localization and domestic manufacturing of oil and gas Industry equipment. *Journal of Technology in Entrepreneurship and Strategic Management, 2*(4), 154-166.

Bertsch, G.K. (1992). After the revolutions: East-West trade and technology transfer in the 1990s. *International Affairs, 68*(2), 336. https://doi.org/10.2307/2623242.

Bigliardi, B., Galati, F., Marolla., G., & Verbano, C. (2015). Factors affecting technology transfer offices' performance in the Italian food context. *Technology Analysis & Strategic Management, 27*(4), 361-384. https://doi.org/10.1080/09537325.2014.1002464.

Bozeman, B., Rimes, H., & Youtie, J. (2015). The evolving state-of-the-art in technology transfer research: Revisiting the contingent effectiveness model. *Research Policy, 44*(1), 34-49. https://doi.org/10.1016/j.respol.2014.06.008.

Buzás, N. (2019). Linking industries across the world (1nd ed). From technology transfer to knowledge transfer: an institutional transition. *In Linking Industries Across the World*, Routledge.

Cho, D.W., & Shenkoya, T. (2020). Technology transfer: economic factors that influence transferor and transferee's choice. *Technology Analysis & Strategic Management, 32*(6), 621-633. https://doi.org/10.1080/09537325.2019.1687873.

Christensen, H.B., Lee, E., Walker, M., & Zeng, C. (2015). Incentives or standards: what determines accounting quality changes around IFRS adoption? *European Accounting Review, 24*(1), 31-61. https://doi.org/10.1080/09638180.2015.1009144.

Dahooie, J.H., Qorbani, A.R., & Daim, T. (2021). Providing a framework for selecting the appropriate method of technology acquisition considering uncertainty in hierarchical group decision-making: Case Study: Interactive television technology. *Technological Forecasting and Social Change, 168*, 120760. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120760.

Ghasemzadeh, A., Malik Nejad, K., & Masgarani, H. (2022). Investigating Factors Affecting the Success of Technology Transfer with the Resistance Economics Approach in the Oil and Gas Industry Using DEMATEL and ANP. *Journal of New Business Attitudes*, *3*(2), 24-35.

Günsel, A. (2015). Research on effectiveness of technology transfer from a knowledge based perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 207*, 777-785. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.165.

Hsiao, C.T., & Liu, C.S. (2012). Dynamic modeling of the development of the DRAM industry in Taiwan. *Asian Journal of Technology Innovation, 20*(2), 277-293. https://doi.org/10.1080/19761597.2012.741396.

Hsu, D.W., Shen, Y.C., Yuan, B.J.C., & Chou, C.J. (2015). Toward successful commercialization of university technology: Performance drivers of university technology transfer in Taiwan. *Technological Forecasting and Social Change, 92*, 25-39. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.11.002.

Huang, S., Katipamula, S., & Lutes, R. (2023). An experimental study on round-trip efficiency of a

preheating control with a medium office building. *Energy and Buildings, 278*, 112622. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112622.

Huong, T. L., & Hieu, N.T.T (2025). Factors affecting the effectiveness of application and technology transfer activities on the productivity of enterrises in quang ninh province, vietnam. *International Journal Profissinal Business Review, Miami*, *10*, 01-28.

Huy, T.H.B., Dinh, H.T., & Kim, D. (2023). Multi-objective framework for a home energy management system with the integration of solar energy and an electric vehicle using an augmented ε-constraint method and lexicographic optimization. *Sustainable Cities and Society, 88*, 104289. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104289.

Kasperson, J.X., & Kasperson, R.E. (2022). Corporate culture and technology transfer, in the social contours of risk. *Routledge,* 118-143.

Latifian, A.H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Keramati, M. (2022). New framework based on a multi-criteria decision-making model of technology transfer in the Auto-battery manufacturing industry under uncertainty. *International Journal of Engineering, 35*(10), 2040-2055. https://doi.org/ 10.5829/IJE.2022.35.10A.21.

Lavoie, J.R., & Daim, T. (2020). Towards the assessment of technology transfer capabilities: An action research-enhanced HDM model. *Technology in Society, 60*, 101217. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101217.

Lee, S., Byong Seon, K., Youngmin, K., Wanki, K., & Wonbin, A. (2018). The framework for factors affecting technology transfer for suppliers and buyers of technology in Korea. *Technology Analysis & Strategic Management, 30*(2), 172-185. https://doi.org/10.1080/09537325.2017.1297787.

Li, X., & Yuan, X. (2022). Tracing the technology transfer of battery electric vehicles in China: A patent citation organization network analysis. *Energy, 239*, 122265. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122265.

Liu, X., & Zhang, D. (2019). An improved SPEA2 algorithm with local search for multi-objective investment decision-making. *Applied Sciences, 9*(8), 1675. https://doi.org/10.3390/app9081675.

Majidpour, M. (2017). International technology transfer and the dynamics of complementarity: A new approach. *Technological Forecasting and Social Change, 122*, 196-206. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.004.

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation, 213*(2), 455-465. https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037.

Mehrinejad, S., Heydari, T., & Kabaranzad, M.R. (2023). Designing a sustainable building technology transfer Model. *Journal of Technology in Entrepreneurship and Strategic Management, 2*(3), 141-154.

Otero, C., Manchado, C., & Gomez-Jauregui, V. (2023). A technology transfer case in graphic engineering. in International Joint Conference on Mechanics, *Design Engineering & Advanced Manufacturing*, Springer.

Ravi, R., & Janodia, M.D. (2021). Factors affecting technology transfer and commercialization of university research in India: a Cross-sectional study. *Journal of the Knowledge Economy, 101*(1), 1-17. https://doi.org/10.1007/s13132-021-00747-4.

Rezaei, GH., Zebarjad, K., & Kadem Samimi, P. (2024). *Investigating barriers to technology transfer between universities and industry using the TOPSIS-method* [Conference presentation], 10th International Congress Civil Engineering, Artchitecture and Urban Development.

Shanei, F. (2023). I*dentification and ranking of factors affecting the success of technology transfer in mapna company (case study: gas turbine project)* [Conference presentation], 2nh & 3rd National Conference on New Findings in Management, Psychology and Accounting.

Ten Berge, J., Lippeniyi, Z., Lippe, T.V.D., & Goos, M. (2020). Technology implementation within

enterprises and job ending among employees. A study of the role of educational attainment, organizational tenure, age and unionization. *Research in Social Stratification and Mobility, 69*, 100548. ttps://doi.org/10.1016/j.rssm. 2020.100548.

Tran, T.-H., Nguyen, P.-H., Nguyen, L.-A.T., & Nguyen, T.-H.T. (2024). Understanding the complexities: Interrelationships of critical barriers to university technology transfer in vietnam using T-Spherical fuzzy MCDM approach. *IEEE Access, 12*, 169683-169719. ttps://doi.org/10.1016/j.rssm.

[1] Augmented Epsilon Constraint Method (AECM)
[2] Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2)
[3] Battelle Memorial Institute
[4] Amirghodsi et al.
[5] Lavoie & Daim
[6] Amini et al.
[7] Cho & Shenkoya
[8] Dahooie et al.
[9] Latifian et al.
[10] Ghasemzadeh et al.
[11] Shanei
[12] Mehrinejad et al.
[13] Bayat Turk et al.
[14] Rezaei et al.
[15] Tran et al.
[16] Ordinal Priority Approach
[17] Ataei et al
[18] Mavrotas
[19] Mean Ideal Distance(MID)
[20] Diversity Metric(DM)
[21] Spacing Metric(SM)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی